

# コヒーレントスミス=パーセル放射を用いた非破壊型バンチ長モニターの研究 STUDY OF NON-DESTRUCTIVE BUNCH LENGTH MONITOR USING COHERENT SMITH-PURCELL RADIATION

山田悠樹, 柏木茂, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 南部健一, 高橋健, 長澤育郎,  
鹿又健, 柴田晃太郎, 齊藤寛峻, 森田希望, 石附勇人, 寺田健人, 濱広幸  
Hiroki Yamada, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu, Ken Takahashi,  
Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Hirotochi Saito, Nozomu Morita, Yuto Ishiduki, Kento Terada  
and Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

## Abstract

Smith-Purcell radiation occurs when charged particles pass near a metal surface with a periodic structure. The wavelength of this radiation is defined by the observation angle and the period length of the diffraction grating. At this time, if the bunch length of the charged particles is sufficiently shorter than the wavelength of the radiation, it becomes coherent radiation. By measuring the angular distribution of the radiation intensity, it is possible to obtain information on the spectrum of the beam, i.e., the longitudinal shape of the bunch. Very short bunches of about 100 fs can be generated at test accelerator t-ACTS, Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University, and thus coherent Smith-Purcell radiation can be obtained in THz frequency region. In this paper, we report the plan for a basic study about coherent Smith-Purcell radiation.

## 1. はじめに

現在東北大学電子光物理学研究センターの試験加速器 t-ACTS では速度集積法による 100 fs 以下の極短バンチの生成および極短電子バンチを用いたテラヘルツ光源の開発研究を行っている。この極短バンチのバンチ長測定にはストリークカメラを用いて OTR を観測する、あるいはコヒーレント遷移放射(CTR)のスペクトル計測を行うといった手法がとられてきた。しかしこれらの方法はいずれも電子ビームを止めてしまう破壊的測定である。また、100fs 以下のバンチについてはストリークカメラの時間分解能が不十分であり正確なバンチ長計測が行えないという問題があった。

スミス=パーセル放射は周期的構造を持った金属表面近傍を電子が通過するときにおきる放射現象である[1]。これを用いたバンチ長計測の試みは以前から行われてきたが、そのバンチ長は主にピコ秒からサブピコ秒の領域であり[2]、100 fs のバンチ長についての観測例はまだない。そこで本稿では 100 fs 以下の電子バンチについてスミス=パーセル放射を使った非破壊のバンチ長測定システムの開発に向けたスミス=パーセル放射の観測実験の計画について報告する。

## 2. スミス=パーセル放射

スミス=パーセル放射の特徴は放射の波長が、回折格子の周期と観測角により規定されていることである。したがって、ビームに対してある角度と別の角度で観測したときそれぞれ異なる波長が得られる。十分遠方で観測したとき、スミス=パーセル放射の波長は

$$\lambda_n = \frac{d}{n} \left( \frac{1}{\beta} - \cos\theta \right) \quad (1)$$

で表される。ここで、 $d$  は格子の周期、 $n$  は放射の次数、 $\theta$  はビームの進行方向からとった観測角、 $\beta = v/c$  は粒子

の相対論的速度である。1 mm の周期を持つ回折格子からは遠赤外領域の放射が得られ、700 nm の周期の格子からは可視光の放射が得られる。

### 2.1 スミス=パーセル放射の強度

スミス=パーセル放射は電子によって完全導体表面上に誘起される電流により生成されるとする表面電流モデル[3]によれば単電子からのスミス=パーセル放射の強度は次の式で与えられる。

$$\left( \frac{dI}{d\Omega} \right)_1 = 2\pi q^2 \frac{Z}{d^2} \frac{n^2 \beta^3}{(1 - \beta \cos\theta)^3} R^2 \exp\left(-\frac{2h}{\lambda_e}\right) \quad (2)$$

$$\lambda_e \equiv \left( \frac{2\omega}{\gamma\beta c} \sqrt{1 + \gamma^2 \beta^2 \sin^2\theta \sin^2\phi} \right)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 $q$  は電子の電荷、 $Z$  は回折格子の全長(周期数  $N=Z/d$ )、 $h$  はビームと回折格子の距離(インパクトパラメータ)、 $\lambda_e$  はエバネッセント波長であり、 $R^2$  は格子効率または放射係数などと呼ばれ格子のプロファイルや放射の観測角に依存する係数である[2]。(2)式より、ビームと回折格子の距離が放射強度に強い影響を与えることがわかる。Figure 1 は(2)式を用いて評価した単一電子からの放射エネルギーの角度分布を示している。インパクトパラメータがわずかに変化すると強度が大きく変化する。また、観測角が 0 度および 180 度に近づくと放射強度が著しく減少している。このため、一つの回折格子から実際に観測できる周波数範囲はさらに制限されてしまうことがわかる。

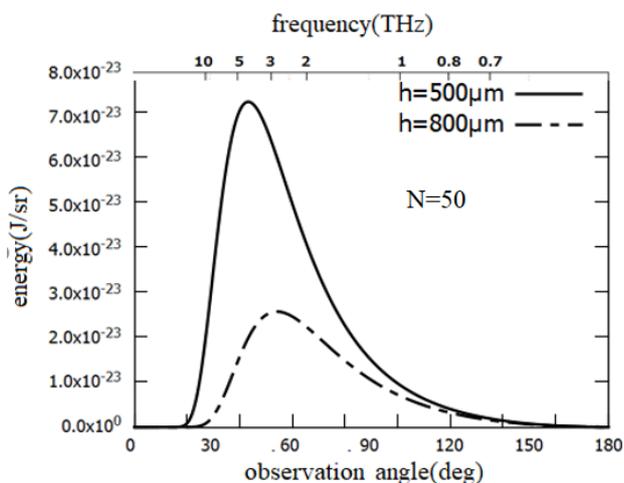


Figure 1: Angle dependence of SPR energy from an electron. Solid and dashed-dotted lines show the emitted energy for the different impact parameters of 0.5 and 0.8 mm.

## 2.2 コヒーレントスミス=パーセル放射

電子バンチの長さが放射波長より短い場合には、個々の電子からの放射の位相が揃うことによって電子の個数 $N_e$ の2乗に比例したコヒーレント放射になる[4].

$$\left(\frac{dI}{d\Omega}\right)_{N_e} = \left(\frac{dI}{d\Omega}\right)_{sp} [N_e + N_e(N_e - 1)|f(\omega)|^2] \quad (4)$$

コヒーレント放射では放射強度にバンチ形状因子 $|f(\omega)|^2$ と呼ばれるバンチの縦方向形状の情報を持った項が含まれる。このため放射の周波数スペクトルをからバンチ形状の情報が得られる。バンチ長が短くなるとより高周波の成分の測定が必要になる。100 fs 以下のガウス分布のバンチ長の場合は 3 THz より高い周波数まで測定する必要がある。

## 3. バンチ長計測

### 3.1 バンチ形状の導出手順

SPR の角度分布を測定することで使用する回折格子の周期長に応じた周波数範囲の放射強度が得られる。この際、目的とするバンチ幅に応じたバンチ形状因子を導出するために、周期長の異なる複数のグレーティングを用いることで、広い周波数領域をカバーする。

まず、ある周期長の回折格子を用いて測定した放射の角度分布を周波数スペクトルの形に変換する。この周波数スペクトルに対して、測定系の周波数特性を補正したうえで、さらに単電子の強度と電子数の二乗の部分を除くことで形状因子が得られる。このようにして得られた形状因子に対して、逆フーリエ変換を行うことで元のバンチ形状が求められる。この際最小位相の復元にクラマースクロニヒ法が用いられる[5].

### 3.2 バンチ長計測における検討事項

前述の手順でバンチ長を求めるにはまず SPR の周波数スペクトルを正確に得る必要がある。そのためにはいくつかの要件がある。

1) 観測する角度によって周波数が異なるために、それぞれの観測点で窓の透過率や検出器の感度の校正

が必要になる。

2) また、周波数スペクトルからバンチ形状因子を得る過程においては、電荷量と単電子の場合の強度を除く必要があるが、このとき強度のインパクトパラメータを正確に把握している必要がある。

3) SPR 強度の角度依存性から周波数スペクトルを求める過程では、場合によってはバックグラウンドを除く必要がある。

1)については、一般的には既知の光源を用いて、用いる測定システムの周波数特性を事前に測定しておくことが考えられる。今回の計画している実験では第一段階として CTR との比較測定を行うことで SPR の強度を評価することを検討している。CTR 等を用いて事前にバンチ長を求めておき、その後同じ条件で生成されたバンチが生成する CTR と CSPR を同一の測定システムで計測する。2)に関しては、グレーティングを設置するステージにビーム観測用のミラーを設置し、バンチの横サイズの観測とビームグレーティング距離の算出に利用することを考えている。また、3)のバックグラウンドの評価に関しては、溝のないダミーの回折格子ブロックを用いて、これからの放射をバックグラウンドとして減算することで SPR の強度を導出する予定である。

## 4. 実験計画

### 4.1 実験の目的

実験の手始めとして、スミス=パーセル放射の基本的な特性を観測することを最初の目的とする。

まず初めは、測定の容易な 90 度方向の SPR を観測する。この角度では周期長 250  $\mu\text{m}$  の回折格子を用いたとき 1.2 THz の放射が得られる。この 90 度の放射について、グレーティングを前後に動かすことでインパクトパラメータ依存性を確認する。

また、波長や強度の角度依存性の評価や、バンチ長を変化させたときの SPR の強度変化もあわせて確認する。

### 4.2 実験セットアップ

Figure 2 に実験のセットアップを示す。真空窓から取り出したマイケルソン干渉計により SPR のスペクトルを計測する。検出器には、THz 領域に感度のある焦電検出器 (PYD-1@PHLUXi[6]) を用いて観測を行う。放射を干渉計に入れる前にアパーチャを通すことで観測する角度範囲を限定し、知りたい角度のみの放射を観測する。アパーチャ直後の集光ミラーの角度と位置を調整することで、異なる放射角度についての観測を可能にする。また Fig. 2 に示したように、ビーム軸の真下からは CTR ミラーが挿入できるようになっており、CTR との比較測定用も行えるようになっている。

放射強度のインパクトパラメータ依存性を測定するための駆動ステージに設置される回折格子の固定治具を Fig. 3 に示した。この治具にはまた、回折格子表面と 45 度の角度でアルミミラーが設置されており、ビーム軸上流から入射したレーザー光を反射させてアラインメントに利用するとともに、ミラーで放射される OTR を用いてビーム位置やサイズの調整・確認も行う。

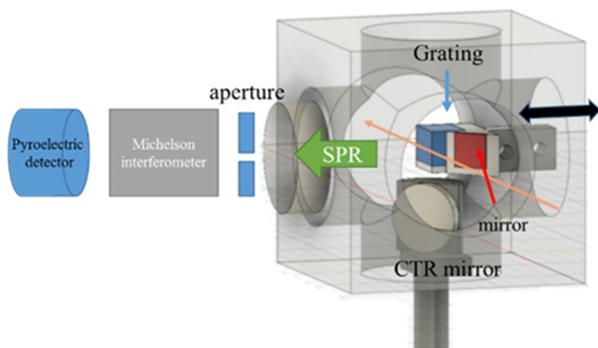


Figure 2: Experimental setup.

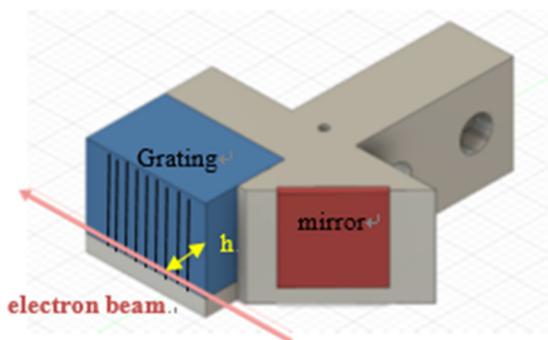


Figure 3: Grating and mirror on a movable stage.

#### 4.3 試作した回折格子の評価

最初のビーム実験に利用する回折格子を試作した。制作した回折格子のパラメータを Table 1 に示す。また、回折格子のブロック全体と回折格子表面を拡大した写真を Fig. 4 に示す。

Table 1: Grating Parameter

grating block size	(15 mm × 10 mm × 10 mm)
grating pitch	0.25 mm
number of groove	50
depth of groove	0.08 mm
width of groove	0.15 mm
material	Aluminum (A5052)

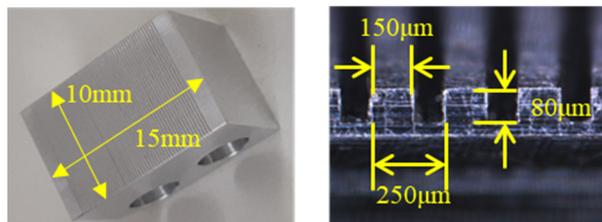


Figure 4: Manufactured grating. Right figure shows a magnified view of the grating surface.

金属回折格子はアルミ合金製で、エンドミルにより溝加工された。溝幅とピッチについて光学顕微鏡による検査を行った結果、加工の精度内( $\pm 5 \mu\text{m}$ )でほぼ均一であることを確認した。また見える限りでの歪み等もなく SPR 放射に影響を与える問題はないと考えられる。

## 5. まとめ

CSPR を用いた測定は、ビーム非破壊で極短バンチ長を得るのに有効な手段であると考えられる。これまでにピコ秒およびサブピコ秒領域での観測例があるが、我々が行おうとしている 100 fs 以下のバンチ長での測定は存在しない。そこで、東北大学の t-ACTS 試験加速器における 100 fs の超短バンチビームを用いて、CSPR 計測による非破壊バンチ長モニターの開発研究を行うものである。CSPR を用いたバンチ長計測ではその角度分布から周波数スペクトルを得る。この際、検出システムの周波数特性、インパクトパラメータの影響、バックグラウンドの影響などに注意を払う必要がある。まずは、CSPR の基本的な測定として、特に放射強度のインパクトパラメータ依存性の測定実験を間もなく行う予定である。

## 参考文献

- [1] S. J. Smith and E. M. Purcell, Phys. Rev. 92, 1069 (1953).
- [2] V. Blackmore *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 12, p. 032803, Mar. 2009.
- [3] J. Brownell, G. Doucas, Phys. Rev. Special Topics - Accelerators and Beams, Vol. 8, 091301 2005.
- [4] T. Nakazato *et al.*, Phys. Rev. Lett. 63, 1245 (1989).
- [5] Oliver Grimm, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 252 (2006) 62-68.
- [6] PYD-1; <http://www.phlux.com/Pyracanth.pdf>